

适用不同粒径含盐砂壤土水分扩散率的通用模式

古莱姆拜尔·艾尔肯,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提

(新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:针对土壤盐分较重的砂壤土确定土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 的问题,采用室内非稳定流水平土柱法对新疆石河子 121 团灌区膜下滴灌棉田不同粒径砂壤土水分扩散率及土壤盐分运移进行了研究。结果表明:粒径为 1.0~2.0 mm 的砂壤土水分扩散率最大,而且变化比较迅速,其次是 0.5~1.0 mm 的砂壤土,最小的是<0.5 mm 的砂壤土,随着土壤粒径的减小,土壤水分扩散率逐渐降低;随着土壤含盐率的增大土壤水分扩散率减少。得出以土壤体积含水率为变量而且还考虑土壤含盐率的综合通用模式,该通用模式较为符合实际情况,并能够较好地反映同一容重、相同水平距离情况下粒径不同时含盐砂壤土的土壤水分扩散率的变化。

关键词:砂壤土粒径;土壤体积含水率;土壤含盐率;土壤水分扩散率;通用模式

中图分类号:S152.7⁺² 文献标志码:A

Universal model for water diffusivity in saline sandy loam soil with different particle sizes

Gulaimubaier · Aierken, Hudan · Tumarbay, Mahmut · Ahmat

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to determine the soil water diffusivity $D(\theta)$ for sandy loam soil with severe soil salinity, the indoor non-stable flow method with horizontal soil column was used to study the water diffusion rate and soil salinity of different size sandy loam soil under the film drip irrigation in the Shihezi 121 group irrigation area in Xinjiang. The results showed that the sandy soil with particle size of 1.0~2.0 mm had the greatest diffusion rate that changed rapidly followed by 0.5~1.0 mm sandy loam. The smallest diffusion rate was with soil particle size less than 0.5 mm in sandy loam. Decreasing soil particle size gradually decreased the soil water diffusivity while increasing soil salinity decreased the soil water diffusion rate. The universal model with the soil volumetric water content variation and the soil salinity as independent variables was more practical. Meanwhile, it closely reflected water diffusion rate change curve of saline sandy loam soil under the same bulk density and the same lateral distance but different particle size.

Keywords: different particle size; water diffusion rate; soil volumetric water content; soil salt content

土壤水分运动参数包括土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 、导水率 $K(\theta)$ 以及比水容量 $C(\theta)$,这些参数综合反映了土壤的持水性能及运移能力^[1]。土壤水分扩散率反映了土壤孔隙度、孔隙大小分布以及导水性能,它是表征土壤水动力学的重要参数之一,并影响土壤中水分运动状况^[2-3]。土壤水分扩散率也是研究水盐运动规律与调控的主要参数^[4]。土壤扩散率受质地、粘粒含量、土壤密度、孔隙度和有机质

等诸多因素的影响^[5]。因此,半干旱地区土壤水分扩散率的研究具有极其重要的理论和实践意义,早已为人们所重视。长期以来,很多学者针对干旱、半干旱地区做了大量的研究工作^[6-9],但是研究土壤盐分对土壤水分扩散率的影响较少见。

用水平入渗实验计算土壤水分扩散率的方法最早是由 Bruce 和 Klute 提出的^[10]。该方法是利用一个半无限长的水平土柱来进行入渗试验,忽略重

力作用,根据一维水平流动的偏微分方程和定解条件,引入 Boltzmann 变换参数后,将偏微分方程化为常微分方程,用解析法求得计算公式,再由试验资料列表计算土壤水分扩散率^[11]。随后,Kirkham 和 Powers^[12]详细论述了这种方法的应用。因为该方法的关键是获得土壤水分分布的光滑曲线,因此得到了广泛应用^[13~20]。此法为室内测定 $D(\theta)$ 的重要方法,在非饱和土壤水分运动研究中起到了重要作用。

土壤中的盐分运动十分复杂,盐分一般随着土壤水分的运动而迁移。由于新疆石河子 121 团是典型的重盐碱土,因此确定含盐土中水溶质运动的综合扩散系数是十分必要的。对盐碱地土壤水盐运动的定量描述是控制区域土壤次生盐碱化的基础,其中的土壤水分扩散率是研究土壤水盐运动不可缺少的参数之一^[21~23]。本研究在建立 Boltzmann 变换参数 η 与土壤体积含水率 θ 定量函数关系的基础上,采用类似于 Bruce 和 Klute 的方法对新疆石河子 121 团灌区膜下滴灌棉田不同粒径含盐砂壤土土壤水分扩散率进行比较,以及对土壤盐分运动规律进行研究。通过水分扩散率的测定可定量模拟单位时间内土壤水分扩散率的距离及其与含水率之间的关系,预测土壤次生盐碱化的发展速度,为土壤次生盐碱化的监测与防治提供理论依据。

1 试验地概况

试验在新疆石河子 121 团进行,该团位于天山北麓,准噶尔盆地南缘,E85°20'~85°48',N44°45'~44°58'。该地属于温带大陆性气候,日照时间长,年平均日照时间 2 864 h,最高气温 35℃,无霜期达 160 d,年降水量 140.2 mm,平均蒸发量 1 789.2 mm,地下水埋深 3~5 m,土壤质地为砂壤土。0~100 cm 土层平均体积质量 1.48 g·cm⁻³,田间持水率为 20.6%(重量含水率)。

2 材料与方法

2.1 采样方法与数据测定

土样采自新疆石河子 121 团试验地,采用 50 m×50 m 网格取样,用自封袋装扰动土土样,采集 117 点共 702 个土样样品,试验地面积为 450 m×650 m。土壤容重采用环刀法测定;土壤颗粒分析是用国际 SL237-1999 中密度计法测定颗粒组成,土壤类型由美国土壤类型三角图确定。其中粉粒占 0.7% (0.002~0.05 cm),粘粒占 23.7% (<0.002 cm),砂粒占 75.6% (0.05~2 cm),土壤质地为砂质壤土,经自

然风干后的土壤过 0.5、0.5~1.0 mm 和 1.0~2.0 mm 筛,按 1.40 g·cm⁻³ 容重装入水平土柱中。

2.2 测定原理

测定原理参见文献[24]。在水平土柱中,使进水端维持接近饱和的稳定边界,土壤含水率,使水分在土柱中作水平渗吸运动,在不计重力影响的条件下进行测定。其一维水平流的微分方程和定解条件为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right]}{\partial x} \quad (1)$$

$$\theta_{(x,t)} = \theta_i \quad x > 0, t = 0 \quad (2)$$

$$\theta_{(x,t)} = \theta_s, \quad x = 0, t > 0 \quad (3)$$

式中, t 为时间(min), x 为水平入渗距离(cm), $D(\theta)$ 为非饱和土壤水分扩散率(cm²·min⁻¹), θ_i 为水平土柱初始含水率, θ_s 为饱和含水率(开始试验后在边界处瞬时形成)

对式(1)进行波尔兹曼变换(Boltzmann),利用定解条件(2)和(3)式,可以求得:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{d\eta}{d\theta} \times \int_{\theta_i}^{\theta} \eta d\theta \quad (4)$$

式中, η 为波尔兹曼参数, $\eta = xt^{-1/2}$ 。

为了便于计算,通常将式(4) 改变为差分的形式,其表达式为:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta \eta}{\Delta \theta} \times \sum_{\theta_i}^{\theta} \eta \Delta \theta \quad (5)$$

通过对(5)式的计算,便可根据实验数据,用列表法计算土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 。

2.3 实验装置

水平土柱试验装置见图 1,土柱由有机玻璃圆筒(内径为 4.6 mm)组成。试样段由 13 个长 4 cm 的圆环组成。在进水边界处($x=0$),为保证土壤体积含水率为饱和含水率但又不产生重力水流的条件,在进水室与土柱之间装设低气泡压力和高传导率的多孔板或滤网。供水装置用以控制水平土柱的作用水头(可考虑保持土柱作用水头略低于大气压力),测量进水量。

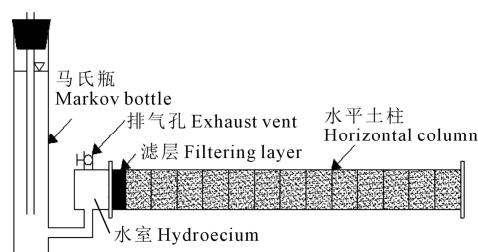


图 1 土壤水分扩散率试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test equipment for determining soil water diffusivity

2.4 实验步骤

(1) 制备土样及装填土柱,准备好足够的试样(风干含水量)。按一定容重装填土柱,将螺杆旋紧然后水平放置。(2)瞬时给进水室充水并使供水装置定位。(3)计时并记下供水箱初始水位读数。(4)经过相当时间(湿润锋面未达土柱末端之前)后,即可结束试验,此时停止供水,松开坚固螺杆,按节取出土壤测定含水率,记下整个试验的历时及总水量。3个重复试验。(5)利用烘干法将烘干土样粉碎,取土水比例1:5搅拌均匀,沉淀后利用DDSJ-308A土壤含盐率仪测定土壤的含盐率(3个重复)。

3 结果与分析

3.1 土壤体积含水率与 Boltzmann 变换参数和土壤含盐率的关系

通过非稳定流水平土柱试验,得到三组试验数据,用式 $\eta=xt^{-1/2}$ 算出不同 θ 值对应的 η 值,并绘制 $\theta-\eta$ 曲线(图2),Boltzmann 参数 $\eta=xt^{-1/2}$ (x 为水平入渗距离, t 为时间)反映了水分在土壤中水平入渗时,湿润峰向前移动的快慢程度^[7]。在进水端土壤体积含水率接近饱和,Boltzmann 变换参数应为零;当土壤体积含水率取初始体积含水率时,Boltzmann 变换参数趋于无穷大。从图可知土壤体积含水率随着 Boltzmann 变换参数的增大而减少。

对粒径<0.5 mm、0.5~1.0 mm 和 1.0~2.0 mm,当体积含水率范围分别在 0.367、0.332、0.317 cm³·cm⁻³以上时,Boltzmann 变换参数随体积含水率缓慢下降;在体积含水率低于 0.367、0.332、0.317 cm³·cm⁻³时,随着体积含水率的降低,Boltzmann 变换参数迅速下降。

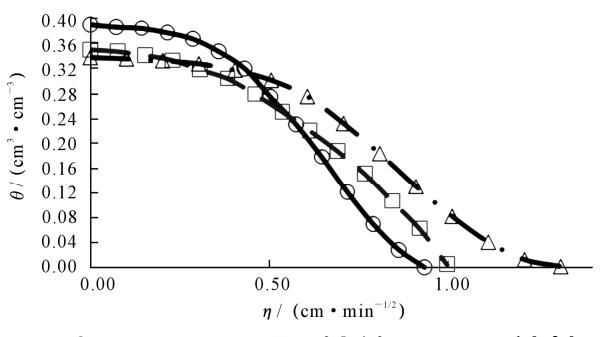


图2 土壤体积含水率(θ)与 Boltzmann 参数(η)的关系

Fig.2 Relationship between soil water content θ and Boltzmann transformation parameter η

cm⁻³以上时,Boltzmann 变换参数随体积含水率缓慢下降;在体积含水率低于 0.367、0.332、0.317 cm³·cm⁻³时,随着体积含水率的降低,Boltzmann 变换参数迅速下降。

土壤盐分一般随着土壤水分的运动而迁移。由土壤体积含水率与土壤含盐率的变化关系(图3)可知,土壤含盐率随着土壤体积含水率的增大而减少,<0.5 mm 粒径的砂壤土的含盐率最高;接下来是 0.5~1.0 mm 粒径的砂壤土;最低的是 1.0~2.0 mm 粒径的砂壤土。这是因为土壤累计入渗时间和总入渗水量随着粒径的增大而减少。土壤含盐率与土壤体积含水率的关系可用线性函数来表示(表1)。从土壤体积含水率与 Boltzmann 变换参数和土壤含盐率之间的关系分析可知 Boltzmann 变换参数和土壤含盐率随着土壤体积含水率的增大而减少。

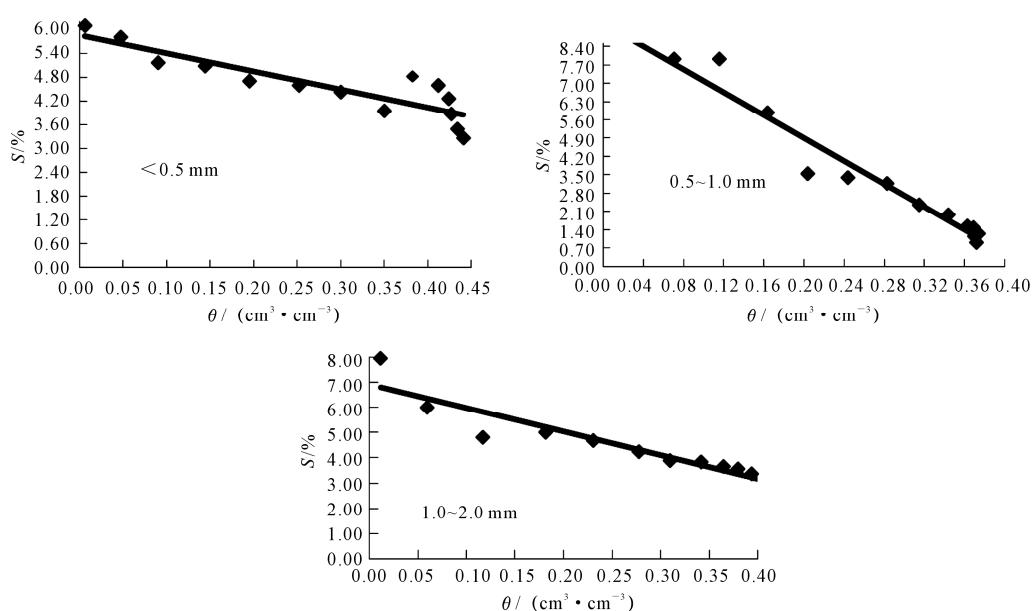


图3 土壤体积含水率(θ)与土壤含盐率(S)的关系

Fig.3 Relationship between soil water content (θ) and soil salt content (S)

3.2 土壤体积含水率与土壤水分扩散率的关系

根据实验数据计算不同体积含水率对应的土壤水分扩散率,并绘制土壤体积含水率与土壤水分扩散率的关系曲线(图4)。

从图中可以看出,对于同一容重、相同水平距离情况下粒径不同时含盐砂壤土的土壤水分扩散率随土壤体积含水率的增加而增加。当含水率接近饱和时,水分扩散率趋于无穷。1.0~2.0 mm 的砂壤土扩散率最大,而且变化比较迅速,其次 0.5~1.0 mm 的砂壤土,最小的是小于 0.5 mm 的砂壤土。这表明土壤机械组成对土壤水分扩散率有较大的影响,表现为随着土壤粒径的减小,土壤水分扩散率逐渐降低。这与 Xie Senchuan 等^[25]的砂性土的非饱和土壤水分扩散率大于粘性土的结论一致。用指数函数拟合土壤水分扩散率与土壤体积含水率之间的关系,具体结果见表2。

3.3 土壤水分扩散率的综合通用表达式

在实际情况中,仅仅土壤体积含水率与土壤水分扩散率的经验公式受到一定的限制,不能较好地反映出土壤水分扩散率的变化曲线。因此要找到一个计算不同粒径含盐沙壤土水分扩散率的通用公式。

表1 土壤体积含水率与土壤含盐率的线性函数拟合分析

Table 1 The linear function fitting analysis between soil water content and soil salt content

粒径/mm Particle size	拟合方程 Fitting equation	a	b	R ²
<0.5		-4.5511	5.8634	0.7776
0.5~1.0	S=aθ+b	-21.99	9.2868	0.9622
1.0~2.0		-9.394	6.9299	0.8873

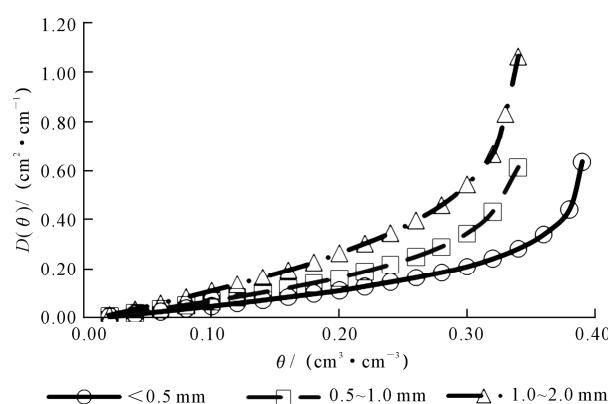


图4 土壤体积含水率 θ 与土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 的关系曲线

Fig.4 Relationship between soil water content (θ) and soil water diffusivity $D(\theta)$

由土壤体积含水率与土壤含盐率的变化关系可知,土壤含盐率随着土壤体积含水率的增大而减少,土壤含盐率与土壤体积含水率的关系可用线性函数来表示(表1)。通过分析土壤体积含水率与土壤含盐率之间关系,再结合土壤体积含水率与土壤水分扩散率之间关系,可知土壤含盐率随着土壤水分扩散率的增大而减少。本文通过上述分析了土壤水分扩散率与土壤体积含水率和土壤含盐率的变化关系,得到了土壤水分扩散率的综合表达式(见表3)。试验分析得出,同一容重、相同水平距离情况下粒径不同时含盐沙壤土拟合的经验公式,拟合程度和回归程度较好。

表2 土壤体积含水率与土壤水分扩散率的指数函数拟合分析

Table 2 The exponential function fitting analysis between soil water content and soil water diffusivity

粒径/mm Particle size	拟合方程 Fitting equation	a	b	R ²
<0.5		0.0134	8.8119	0.8506
0.5~1.0	$D(\theta)=ae^{b\theta}$	0.015	10.745	0.8455
1.0~2.0		0.0179	9.88	0.8646

表3 土壤水分扩散率的综合表达式

Table 3 The soil water diffusivity of comprehensive expression

粒径/mm Particle size	拟合方程 Fitting equation	R ²
<0.5	$D(\theta)=0.3308e^{3.646 \times 10^4(\theta+0.220S-1.288)}$	0.8506
0.5~1.0	$D(\theta)=0.015e^{3.237 \times 10^3(\theta+0.045S-0.422)}$	0.8455
1.0~2.0	$D(\theta)=0.8003e^{1.369 \times 10^2(\theta+0.106S-0.738)}$	0.8646

4 结果与讨论

1) 对于同一容重、相同水平距离情况下粒径不同时含盐砂壤土的土壤体积含水率与土壤水分扩散率呈单调递增关系。1.0~2.0 mm 的砂壤土扩散率最大,而且变化比较迅速,其次为 0.5~1.0 mm 的砂壤土,最小的是小于 0.5 mm 的砂壤土。随着土壤粒径的减小,土壤水分扩散率在逐渐降低。当土壤体积含水率接近饱和时,水分扩散率趋于无穷。

2) 对于同一容重、相同水平距离情况下粒径不同时含盐砂壤土的土壤含盐率与土壤水分扩散率呈单调递减关系。<0.5 mm 粒径的砂壤土的含盐率最高,其次为 0.5~1.0 mm 粒径的砂壤土,最低的是 1.0~2.0 mm 粒径的砂壤土。

3) 新疆盐碱地土壤面积较大,土壤水分运动参数计算中考虑土壤的含盐量是较为符合实际。土

壤水分扩散率 $D(\theta)$ 的通用模式中综合考虑土壤体积含水率和土壤含盐率,得出的经验公式能够较好地反映不同粒径含盐砂壤土的土壤水分扩散率。

参 考 文 献:

- [1] 张福仓,张一平.用一步出流法测定土壤的导水参数[J].西北农业大学学报,1993,21;(增刊)129-133.
- [2] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1998;321-326.
- [3] 华孟,王坚.土壤物理学[M].北京:北京农业大学出版社 1993. 102-105.
- [4] 串志强,盛钰,赵成义,等.膜下滴灌条件下绿洲棉田土壤水分运动数值模拟[J].干旱区地理,2008, 31(5):673-678.
- [5] 易军,尚三林,杨正礼,等.宁夏黄灌区灌淤土水力参数研究[J].灌溉排水学报,2011,30(2):46-50.
- [6] 贾宏伟,康绍忠,张富仓.土壤水力参数的单一参数模型[J].水力学报,2006, 37(3): 272-277.
- [7] 邓建才,卢信,陈效民,等.封丘地区土壤水分扩散率的研究[J].土壤通报,2005, 36(3): 317-320.
- [8] 杨香云,陈晓飞,丁加丽,等.溶质种类和浓度对棕壤土水分扩散率的影响[J].灌溉排水学报,2004, 23(3): 45-48.
- [9] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.甘肃南小河流域土壤水分扩散率单一参数模型的建立及应用[J].干旱区地理,2009, 32(5):714-779.
- [10] Bruce R. R., Klute A. The measurement of soil moisture diffusivity [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1956, (20): 458-462.
- [11] 魏新平,王文焰.用水平土柱测定非饱和土壤水扩散率的瞬时剖面法[J].水利水电技术,1999 ,30(9) : 61-62.
- [12] Kirkham D., POWERS W. L. Advanced Soil Physics[M].NewYork: Wiley-Inter-science, 1972, 256-264.
- [13] 胡顺军,李修仓,田氏彦,等.阿拉尔绿洲灌区棉田土壤水分扩散率的测定[J].干旱区地理,2009, 23 (6): 912-916.
- [14] Liu Xinpings, Zhao Halin, He Yuhui, et al. Water diffusivity of sandy soil of different particle sizes in typical sandy cropland [J]. Environmental Science and Information Application Technology, 2009, 04(7) : 335-338.
- [15] Wang Chengzhi, Yang Peiling, Yang Linlin. Experimental Studies on Unsaturated Soil Water Diffusivity of Soil Waste water Irrigation District in Beijing[C]//都市农业工程科技创新与发展—2005年北京都市农业工程科技创新与发展国际学术研讨会论文集(I).北京:中国水利水电出版社,2005:226-231.
- [16] Londra P A, Valiantzas J A. Soil Water Diffusivity Determination using a New Two-Point Outflow Method[J]. Soil Sci.Soc.Am.J, 2011, 75(4):1343-1346.
- [17] David M. Deery, John B. Passioura, Jason R. Condon, Asitha Katupitiya. Uptake of Water from a Kandosol Subsoil: I. Determination of Soil Water Diffusivity[J]. Plant Soil (2013) ,368:483-492.
- [18] 刘新平,张铜会,何玉惠.不同粒径砂土水分扩散率[J].干旱区地理,2008,31(2):249-253.
- [19] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁砂地土壤水分扩散率比较研究 [J].土壤通报,2014,45(3):595-600.
- [20] 甘永德,胡顺军,陈秀龙.土壤盐分对土壤水分扩散率的影响[J].水土保持通报,2010,30(6):56-59.
- [21] 宋新山,何岩,邓伟,等.松嫩平原盐碱土水分扩散率研究[J].土壤与环境,2000,9(3):210-213.
- [22] 李志洪.松嫩平原盐渍土壤水分水平运移模拟研究[C]//松嫩平原盐碱地与风砂地农业综合发展研究.北京:科学出版社.1997. 102-112.
- [23] 张立新,韩文玉,顾同欣,等.冻融过程对景电灌区草窝滩盆地土壤水盐动态的影响[J].冰川冻土,2003,25(3):297-302.
- [24] 杨文智,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社, 2000,154-162.
- [25] Xie Senchuan, Hui Shibo, Li Hua zhen. Determination of unsaturated soil hydraulic parameters [J]. Hydrogeology and Engineering Geoglogy,1982,5(1):8-15.